

# 微尺度金属材料中耦合损伤的尺寸效应\*

班昊轩<sup>1</sup> 姚寅<sup>2</sup> 陈少华<sup>2</sup>

( 1:中国科学院力学研究所非线性国家重点实验室 100190 )

( 2:北京理工大学先进结构技术研究院 100190 )

**摘要** 本文基于 C-W 低阶应变梯度塑性理论与连续介质损伤力学提出了一种考虑损伤的低阶应变梯度塑性理论。该理论模型中不包含任何高阶应力和高阶应变率, 应变梯度仅作为内变量来影响切线硬化模量, 并且材料的弹性模量与内禀长度都受到损伤的影响。我们基于该理论模型, 分析了两个典型的微尺度结构问题: 细丝扭转与薄臂梁弯曲, 发现随着结构变形的增大, 材料的刚度逐渐减小, 并且理论结果较好的拟合了现有的实验数据。

**关键词:** 微尺度材料, 尺寸效应, 损伤效应, 应变梯度, 内禀长度

## 一、引言

特征尺度为 0.1~10 微米量级的金属材料其力学性能呈现出明显的尺寸效应<sup>[1]</sup>, 并且金属材料在服役过程中不可避免的出现内部损伤<sup>[2]</sup>。因此需要发展一种考虑损伤的应变梯度塑性理论, 从而准确刻画微尺度金属材料力学行为。本文提出耦合尺寸效应与损伤效应的理论模型准确预测了两类经典微尺度结构问题, 新的理论模型有望为更为复杂的微米颗粒增强金属基复合材料及纳米晶梯度材料提供新的研究思路。

## 二、理论模型

### 2.1 C-W 应变梯度理论

C-W 低阶应变梯度理论保留了经典增量型 J<sub>2</sub> 形变理论的基本框架<sup>[3]</sup>, 仅引入了新的增量型硬化关系:

$$\dot{\sigma}_e = A'(\varepsilon_e) \left(1 + \frac{l^2 \eta^2}{\varepsilon_e^2}\right)^\alpha \dot{\varepsilon}_e = B(\varepsilon_e, l\eta) \dot{\varepsilon}_e \quad (1)$$

### 2.2 考虑损伤的应变梯度塑性理论

损伤对内禀长度的影响:

\* 通讯作者: 电话: +86-10-82543960

电子邮件: [chenshaohua72@hotmail.com](mailto:chenshaohua72@hotmail.com) (陈少华).

国家自然科学基金: (11372317、11532013、11402270).

$$\bar{l} = 18\lambda^2 \left( \frac{\bar{\mu}}{\sigma_Y} \right)^2 b = (1-D)^2 l \quad (2)$$

耦合损伤后微尺度材料增量型硬化律:

$$\begin{cases} \dot{\sigma}_e = C(\varepsilon_e, \bar{l}\eta) \dot{\varepsilon}_e \\ C(\varepsilon_e, \bar{l}\eta) = [1-D(\varepsilon_e)]A'(\varepsilon_e) \left(1 + \frac{\bar{l}^2 \eta^2}{\varepsilon_e^2}\right)^\alpha - \frac{dD}{d\varepsilon_e} \int_0^{\varepsilon_e} A'(\beta) \left(1 + \frac{\bar{l}^2 \eta^2}{\beta^2}\right)^\alpha d\beta \end{cases} \quad (3)$$

### 三、结果分析

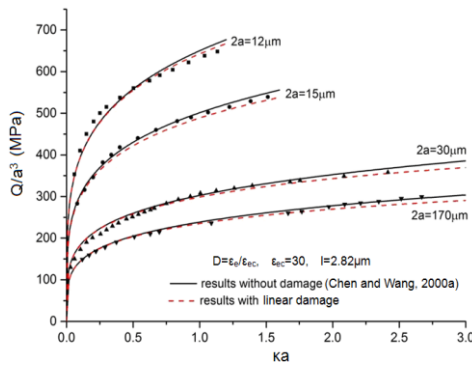


图 1 细丝扭转

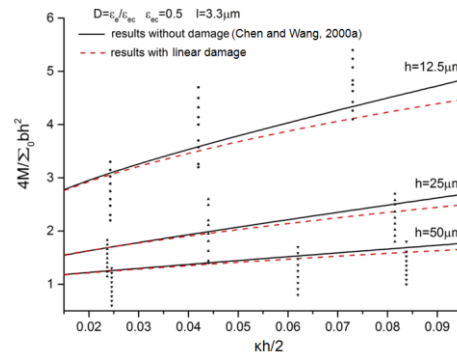


图 2 薄壁梁弯曲

### 四、结论

(1) 建立一种考虑损伤的应变梯度塑性理论, 新的理论模型包含 **C-W** 应变梯度理论与连续介质损伤力学, 未引入高阶应力及高阶边界条件。并且损伤同时影响切向硬化模量和内禀长度; (2) 新的理论模型准确刻画了细丝扭转与薄壁梁弯曲中耦合损伤的尺寸效应。虽然在这两类实例中损伤效应并不明显, 但新的理论模型可以为更复杂的微米颗粒增强金属基复合材料的硬化模量递减现象<sup>[4]</sup>及纳米晶梯度材料力学性质<sup>[5]</sup>提供新的研究思路。

### 参 考 文 献

- 1 Fleck, N.A., Muller, G.M., Ashby, M.F., Hutchinson, J.W., 1994. Strain gradient plasticity: Theory and experiment. *Acta Metall. Mater.* 42(2), 475-487.
- 2 Lemaitre, J., 1992. A course on damage mechanics, Springer, Berlin.
- 3 Chen, S.H., Wang, T.C., 2000. A new hardening law for strain gradient plasticity. *Acta Mater.* 48(16), 3997-4005.
- 4 Liu, B., Huang, W.M., Huang, L., Wang, H.W., 2012. Size-dependent compression deformation behaviors of high particle content B4C/Al composites. *Mater. Sci. Eng. A* 534(1), 530-535.
- 5 Fang, T.H., Li, W.L., Tao, N.R., Lu, K., 2011. Revealing extraordinary intrinsic tensile plasticity in gradient nano-grained copper. *Science*, 331(6024), 1587-1590.